中国生态农业学报 2016年1月 第24卷 第1期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2016, 24(1): 36−46

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150554

不同间作播期和密度对甜瓜/向日葵间作系统氮素利用效率的影响*

刘 斌[1] 谢 飞[2] 凌一波[2] 陈年来[1,2**]

(1. 甘肃农业大学园艺学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070)

摘 要 在大田条件下以甜瓜和向日葵为试材，研究两种作物单作和向日葵间作播期(甜瓜伸蔓期、开花坐果期、果实膨大期)、间作密度[高(24 975 株·hm^{-2})、中(22 200 株·hm^{-2})和低(19 980 株·hm^{-2})]对间作系统和两种作物单作的氮素积累量、氮素利用效率和光能利用效率的影响。结果表明，间作显著提高了间作系统甜瓜的氮素累积和利用效率，却降低了向日葵的氮素累积和利用效率。间作甜瓜植株地上部的氮素累积量平均为195.08 kg·hm^{-2}，较单作甜瓜(172.61 kg·hm^{-2})提高13.0%，氮素利用效率和氮肥偏生产力均显著高于单作(分别提高40.5%和55.4%)。间作系统向日葵氮素利用效率和氮肥偏生产力较单作降低8.2%和58.4%，而氮素收获指数较单作提高4.9%。在甜瓜伸蔓期、开花坐果期和果实膨大期间作向日葵，间作系统的氮素利用效率较同播期的单作向日葵分别提高43.5%、12.5%和59.8%；果实膨大期间作向日葵，间作系统的氮素利用效率较单作甜瓜提高6.7%。在甜瓜伸蔓期、开花坐果期和果实膨大期间作向日葵，间作系统的氮肥偏生产力较同播期的单作向日葵提高6.5%、32.1%和40.4%，较单作甜瓜分别降低22.5%、10.1%和34.3%；在甜瓜伸蔓期、开花坐果期和果实膨大期间作向日葵，间作系统的氮素收获指数较同播期的单作向日葵分别降低7.2%、7.7%和12.5%。高、中和低3个间作密度下，间作系统的氮素利用效率较同密度甜瓜单作分别降低14.2%、20.4%和13.9%，较向日葵单作分别提高25.2%、20.0%和9.5%，氮肥偏生产力较同密度甜瓜单作降低29.6%、15.6%和21.1%；高密度和低密度间作处理的间作系统氮素收获指数较向日葵单作提高2.7%和1.4%，而中密度间作降低7.6%。间作系统甜瓜的光能利用效率与氮素利用效率呈显著正相关关系，向日葵的光能利用效率与氮素利用效率无显著相关。在河西绿洲灌溉条件下，氮素利用率较高的适宜向日葵间作播期为甜瓜果实膨大期，适宜间作株距为40 cm(密度为24 975 株·hm^{-2})。

关键词 甜瓜/向日葵间作 间作时间 种植密度 氮素利用效率 氮肥偏生产力 氮素收获指数 光能利用效率

中图分类号: S344.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)01-0036-11

Effects of intercropping time and planting density on nitrogen use efficiency of melon-sunflower intercropping system*

LIU Bin[1], XIE Fei[2], LING Yibo[2], CHEN Nianlai[1,2**]

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract A field experiment comprising of monoculture and intercropping of two crops (melon and sunflower) was conducted at three sunflower sowing times (at vine running, flowering and fruit expansion stages of melon) at three

* 甘肃省水利厅项目“瓜葵间作高水效立体种植技术及灌溉制度研究”资助
** 通讯作者: 陈年来，主要从事蔬菜栽培生理及技术研究。E-mail: chennl@gsau.edu.cn
刘斌，主要从事蔬菜生理与栽培技术研究。E-mail: liubin3626570@163.com
收稿日期: 2015−05−12 接受日期: 2015−10−12

* Funded by the Project of Department of Water Resources of Gansu Province “The Research of High Water-efficiency Cultivation Technology and Irrigation Scheme of Melon/Sunflower Intercropping System”
** Corresponding author, E-mail: chennl@gsau.edu.cn
Received May 12, 2015; accepted Oct. 12, 2015

intercropping densities of each crop [high (24 975 plant·hm^{-2}), medium (22 200 plant·hm^{-2}) and low (19 980 plant·hm^{-2})] to study plant nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency and to determine the relationship between solar energy utilization efficiency and nitrogen use efficiency. The results showed that intercropping significantly increased nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency of melon, but reduced those of the sunflower. Under intercropping conditions, nitrogen accumulation of above-ground parts of melon was 195.08 kg·hm^{-2}, increasing by 13.0% compared with that of monocultured melon (172.61 kg·hm^{-2}). Nitrogen use efficiency and partial nitrogen productivity of intercropped melon significantly increased, respectively, by 40.5% and 55.4%, over those of monocultured melon. Nitrogen use efficiency and nitrogen partial productivity of sunflower under intercropping decreased, respectively, by 8.2% and 58.4% compared with those of monocultured sunflower, but nitrogen harvest index increased by 4.9%. Nitrogen use efficiency of intercropping system at three sunflower intercropping times (vine running, flowering and fruit expansion stages of melon) increased, respectively, by 43.5%, 12.5% and 59.8% over that of monoculture sunflower of the same sowing times. Also nitrogen use efficiency of intercropping system intercropped at fruit expansion period of melon increased by 6.7%, compared with average nitrogen use efficiency of monocultured melon. Partial nitrogen productivity of intercropped system with three intercropping times increased, respectively, by 6.5%, 32.1% and 40.4% compared with monocultured sunflower of the same sowing time, but decreased, respectively, by 22.5%, 10.1% and 34.3% compared with the average value for monoculturd melon. Nitrogen harvest index of intercropping system at three sunflower intercropping times decreased by 7.2%, 7.7% and 12.5%, respectively, compared with that of monocultured sunflower. Nitrogen utilization efficiencies of intercropping system at three intercropping densities reduced by 14.2% (high density), 20.4% (middle density) and 13.9% (low density), respectively, compared with that of monocultured melon at the same corresponding density, but increased, respectively, by 25.2%, 20.0% and 9.5% compared with the average value of monocultured sunflower. Partial nitrogen productivity of intercropping system with three intercropping densities decreased, respectively, by 29.6%, 15.6% and 21.1% compared with the corresponding treatments of monocultured melon. Nitrogen harvest index of intercropping system at high and low intercropping densities increased, respectively, by 2.7% and 1.4% compared with average nitrogen harvest index of monocultured sunflower, but decreased by 7.6% at medium density. There was significantly positive correlation between nitrogen use efficiency and light use efficiency of melon under intercropping system, but not with sunflower. The results suggested that fruit expansion period of melon was the most suitable intercropping time of sunflower and 40 cm plant spacing was the optimum planting density in melon-sunflower intercropping system, which resulting in high nitrogen use efficiency.
Keywords　Melon-sunflower intercropping; Intercropping time; Planting density; Nitrogen use efficiency; Partial nitrogen productivity; Nitrogen harvest index; Light use efficiency

间作是在时间和空间上提高土地和气候资源利用率的一种集约化种植方式，能促进种植业高效、持续增产和增加农田生物多样性[1]。作物对氮的吸收和利用是农业生态系统中氮循环的重要过程，氮素吸收和积累是作物产量形成的重要基础[2]。研究表明，作物生育期内的干物质积累、植株氮素含量及氮素吸收和利用是影响作物产量和品质的重要因素[3]。

合理的间套作通过提高作物对养分的截获和利用，进而提高系统生产力[4]。间作条件下作物的氮素吸收量和利用效率往往比在单作条件下高，表现出明显的间作优势，主要原因是间作提高了系统对资源的利用，尤其是氮素营养供应上拓宽了作物的氮素营养生态位，更好地满足了作物氮素营养的要求[2,5]。黑麦(*Avena sativa*)/红三叶草(*Trifolium pratens*)间作、黑麦/豌豆(*Pisum sativum*)间作条件下，作物氮素累积量和生物量都高于单作[6]。小麦/蚕豆(*Triticum aestivum*/*Vicia faba*)间作显著提高了整个生育期内小麦地上部植株含氮量，显著增加了小麦叶和穗的氮含量，为干物质的形成和间作产量的提高奠定了基础[7–8]。植物氮素营养状况的好坏，直接影响其光合速率和生长发育，并最终影响产量和光能利用率。在单一作物种植情况下，农田光能利用率只有1%左右[9]。间作能合理配置作物群体，使作物高矮成层，相间成行，借助选择高光效植物、高矮搭配、层次嵌合、时序交叉等措施，可在单位土地面积上扩大光合面积，延长光合时间，截取更多的有效光能，使光能利用率增加。光与氮素协同互作影响植株的物质生产、分配和碳、氮代谢，光照和氮素在植物生长中只有维持平衡、协调的供应水平，才能发挥两者对作物生长最佳的互作效应，保证作物正常地生长[8,10]。

间作时期和密度对间作作物至关重要，对作物的氮素营养状况、氮素利用效率和光能利用效率都有影响。研究表明，春小麦/玉米(*Zea mays*)带状间作共处期间(小麦三叶期—成熟期，玉米播种期—抽雄

期)小麦的含氮量都高于单作，而玉米的含氮量则均低于单作[11]，共处期短的间作方式，后作物避免了与前作物生长高峰期的光能与营养竞争，这样后作物在前作物收获后，能迅速恢复旺盛生长。在研究向日葵(*Helianthus annuus*)/马铃薯(*Solanum tuberosum*)的间作系统中表明，提高间作作物的氮素利用效率的方法为适当提早马铃薯播种期或使用早熟耐荫的马铃薯品种，使间作中2种作物最大冠层覆盖时期相互错开，降低向日葵对马铃薯的遮蔽效应，利于提高间作系统的生产力水平[12]。研究向日葵/马铃薯的2种间作密度表明，在4行马铃薯：4行向日葵间作密度下，马铃薯氮素利用效率低于单作，而向日葵的氮素利用效率高于单作，在2行马铃薯：2行向日葵间作密度下，向日葵的氮素利用效率与单作无显著差异[12]。

向日葵和甜瓜(*Cucumis melo*)是甘肃河西绿洲地区重要的经济作物。近年来，向日葵与其他作物的间套作种植方式已被许多向日葵产区的农民采用，给农业生产带来了显著的经济效益[13]。在种植西瓜(*Citrullus lanatus*)、甜瓜一熟有余、两熟不足的地区，进行瓜葵间作和套作，即通过甜瓜、西瓜间作油葵(*Helianthus annuus*)或食葵，可实现土地单位面积经济效益的最大化。种植密度和播期会影响间作系统作物的干物质积累、光能利用率和氮素利用效率。但长期以来，有关播期和密度对间作系统的作用大多集中在对作物群体冠层结构[14]和光能利用效率[15]、水分利用特征及效率[16]、生长发育、产量及经济效益[17–18]等研究。而间作条件下间作时期和种植密度对作物氮素的累积和氮素利用效率影响少见报道。因此，本试验在大田条件下设定不同间作时期和间作密度，比较分析甜瓜和向日葵单作与不同间作时期、间作密度下的氮素积累和利用及氮素利用效率和光能利用效率的关系，为优化甜瓜/向日葵间作模式的关键技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2013年4—10月在甘肃民勤县农业技术推广中心试验站进行。试验区位于甘肃河西内陆河流域东端，地理位置介于E103°02′~104°02′，N38°05′~39°06′之间，是一个半封闭的内陆荒漠区，温带大陆性极干旱气候，多年平均降水量为110 mm，且多为低于5 mm的无效降水，年蒸发量为2 644 mm，年均气温7.4 ℃，年日照时数2 832 h。

1.2 试验材料

供试甜瓜品种为‘金红宝’(中熟品种)，当地普遍种植，具有丰产性好、品质较优、耐储运、抗病能力强等优点。供试向日葵(食葵)品种为‘LD5009’(中晚熟品种)，为杂交种，籽粒商品型好，仁大壳满，出苗快、易保苗，抗旱、耐瘠薄、产量高。两个品种均由甘肃省民勤县农业技术推广中心提供。

1.3 试验设计与处理

本试验甜瓜/向日葵间作处理采用二因素裂区试验设计。主区为间作(向日葵播种)播期，设3个水平，分别为甜瓜伸蔓期、开花坐果期和果实膨大期；副区为间作种植密度，通过主栽作物(甜瓜)株距调节，设高(40 cm)、中(45 cm)和低(50 cm)3个水平，间作向日葵直播于行内两株甜瓜之间，株距随甜瓜的株距变化调节，株距为40 cm、45 cm和50 cm，高中低密度间作分别为24 975株·hm^{-2}、22 200株·hm^{-2}、19 980株·hm^{-2}，行距为100 cm。单作向日葵分别在甜瓜播种期、幼苗期、伸蔓期、开花坐果期和果实膨大期播种，不设密度处理，株距40 cm，行距50 cm，密度为49 995株·hm^{-2}。单作甜瓜3个株距水平与间作相同，行距100 cm。试验共17个处理组合，3次重复，51个小区。甜瓜单作及与向日葵间作小区面积均为2 m×10 m=20 m^2，向日葵单作小区面积为4 m×5 m=20 m^2。单、间作甜瓜均于2013年4月30日播种，8月5日收获。单作向日葵于2013年4月30日播种，间作向日葵分别于甜瓜伸蔓期(6月9日)、开花坐果期(6月29日)、果实膨大期(7月13日)播种，分别于9月20日、10月10日、10月20日收获。

甜瓜单间作采用水旱塘栽培，水沟宽70 cm，旱塘宽130 cm，双蔓整枝，每株留1果。开沟时施磷酸二铵150 kg·hm^{-2}，尿素300 kg·hm^{-2}，过磷酸钙750 kg·hm^{-2}；坐瓜后追施尿素150 kg·hm^{-2}和硫酸钾75 kg·hm^{-2}；果实膨大期追施尿素75 kg·hm^{-2}。向日葵单作采用地膜覆盖、平作栽培，地膜幅宽140 cm，每幅地膜种3行。基施过磷酸钙750 kg·hm^{-2}，磷酸二铵150 kg·hm^{-2}，尿素300 kg·hm^{-2}，硫酸钾150 kg·hm^{-2}，现蕾前追施尿素225 kg·hm^{-2}，始花期追施尿素150 kg·hm^{-2}。

1.4 测定指标与方法

作物生育期总辐射用HOBO气象观测系统(H21型)自动获取，单作甜瓜生育期(4月30日—8月5日)总日射量累计为1.66×10^{13} J·hm^{-2}，单作向日葵生育期(4月30日—9月2日)总日射量累计为2.02×10^{13} J·hm^{-2}；间作处理生育期分别为4月30日—9月20

日、4 月 30 日—10 月 10 日、4 月 30 日—10 月 20 日, 总日射量累计分别为 2.30×10^{13} J·hm^{-2}、2.66×10^{13} J·hm^{-2} 和 2.84×10^{13} J·hm^{-2}。

甜瓜和向日葵植株氮含量分析在采收前进行, 每小区选 5 株, 按整株、叶、茎、产品器官(果实、种子)分样, 105 ℃下杀青 30 min, 80 ℃烘干至恒重, 测定干物质量。植株全氮含量测定用半微量凯氏定氮法[19]。

$$光能利用率(PUE)=(H\times M)/E\times100\% \quad (1)$$

式中: H 为单位干物质(g)所放出热量, 一般采用平均值 1.779×10^4 J·g^{-1}; M 为单位面积上平均物质收获量(g·hm^{-2}); E 为农作物生育期间的总日射量累计值(J·hm^{-2})[20]。

氮素利用效率(NUE)=经济产量/成熟期植株氮素累积量[21]　(2)

氮素收获指数=产品器官氮素累积量/地上部氮素累积量[22]　(3)

氮肥偏生产力(NPFP)=经济产量/施氮量[23]　(4)

1.5　数据处理与分析

采用SPSS 19.0软件进行数据统计分析, 采用新复极差法(Duncan)比较不同处理间的差异显著性, 相关性用Pearson系数作双尾检验, 采用Microsoft Excel 2007软件制图。

2　结果与分析

2.1　甜瓜氮素累积和利用效率

2.1.1　甜瓜单作和间作的氮素累积量

间作处理甜瓜植株地上部氮素累积量(195.08 kg·hm^{-2})较单作处理(172.61 kg·hm^{-2})高 13.0%(表 1), 差异显著。不同播期下, 随着间作播期的推迟, 植株地上部氮素累积量呈现下降的趋势, 伸蔓期间作处理最高, 平均为 212.30 kg·hm^{-2}; 开花坐果期间作处理其次, 平均为 199.13 kg·hm^{-2}; 果实膨大期间作处理最小, 平均为 173.82 kg·hm^{-2}。伸蔓期和开花坐果期间作处理均显著高于单作, 果实膨大期间作处理与单作无显著差异。不同密度下, 随着间作密度的减小, 甜瓜植株地上部氮素累积量呈现上升的趋势。低密度间作最高, 为 203.58 kg·hm^{-2}; 3 种密度间作处理植株地上部氮素累积量较单作提高 3.4%~23.1%。表明间作处理甜瓜植株地上部的氮素累积量整体高于单作处理, 间作能增加甜瓜植株对氮素的吸收和累积。

表 1　不同间作时期和种植密度下单作及与向日葵间作的甜瓜氮素累积量

Table 1　Nitrogen accumulation of melon monocultured and intercropped with sunflower at different intercropping times with different densities　kg(N)·hm^{-2}

种植模式 Planting pattern	间作播期 Intercropping time	种植密度 Planting density	蔓 Vine	叶 Leaf	果实 Fruit	地上部合计 Total of above-ground
单作 Monoculture	—	高 High	9.05±0.57a	23.29±2.00a	147.17±4.48a	179.50±3.07a
	—	中 Medium	7.69±1.59a	22.97±3.36a	128.56±6.07a	159.22±8.34b
	—	低 Low	8.76±2.02a	30.47±3.10a	139.87±8.98a	179.11±13.08a
		平均 Average	8.50±0.14A	25.58±2.45A	138.53±5.41B	172.61±6.70B
与向日葵间作 Intercropping with sunflower	伸蔓期 Extension vine	高 High	5.75±0.16a	15.27±3.64b	173.46±19.22b	194.47±23.08b
		中 Medium	7.48±0.72a	29.29±7.96a	204.54±18.01a	241.31±19.88a
		低 Low	6.46±0.21a	17.74±0.45ab	176.91±15.44b	201.11±15.16b
		平均 Average	6.56±0.50B	20.77±4.32A	184.97±9.84A	212.30±14.63A
	开花坐果期 Flowering and fruit bearing	高 High	11.52±2.19a	25.01±4.33a	184.80±13.11a	221.33±19.11a
		中 Medium	7.73±1.82a	20.79±2.40a	153.88±12.50a	182.41±16.47a
		低 Low	8.55±2.75a	27.08±3.68a	158.01±16.93a	193.65±20.18abc
		平均 Average	9.27±1.15A	24.29±1.85A	165.56±9.69B	199.13±11.56A
	果实膨大期 Fruit expanding	高 High	7.50±1.20a	20.85±0.93a	112.72±5.95b	141.07±6.54b
		中 Medium	9.58±0.71a	27.82±2.23a	127.01±4.73b	164.41±2.48ab
		低 Low	6.74±0.73a	25.58±4.95a	183.66±39.41a	215.98±25.87a
		平均 Average	7.94±0.85AB	24.75±2.05A	141.13±21.66B	173.82±22.13B
间作平均 Average of intercropping			7.92±0.18AB	23.27±1.26A	163.92±12.69A	195.08±11.29A

同列数据后不同小写字母表示同一处理的不同密度差异显著(P<0.05), 同列数据后不同大写字母表示不同间作期与单作差异显著(P<0.05)。下同。Different lowercase letters in the same column mean significant difference among different densities of the same planting pattern and intercropping time (P < 0.05). Different capital letters in the same column mean significant difference between monoculture and intercrop with different intercropping times (P < 0.05). The same below.

不同间作播期下，间作处理甜瓜各器官中，蔓的平均氮素累积量为开花坐果期>果实膨大期>伸蔓期，开花坐果期间作氮素累积量最高，为 9.27 kg·hm^{-2}，显著高于伸蔓期(6.56 kg·hm^{-2})。随着间作播期的推迟，叶片的氮素累积量呈增加的趋势，果实膨大期间作最高，为 24.75 kg·hm^{-2}；伸蔓期最低，为 20.77 kg·hm^{-2}。随着间作播期的推迟，果实的氮素累积量呈下降趋势，伸蔓期间作最高，为 184.97 kg·hm^{-2}，分别较开花坐果期和果实膨大期间作高 11.7%和 31.1%，差异显著。表明在甜瓜生育期的中后期进行间作，有利于提高甜瓜蔓和叶片的氮素累积量，在前期进行间作，有利于提高甜瓜果实氮素累积量。同一播期内，伸蔓期进行间作，果实、叶片和茎的氮素累积量均表现为中密度>低密度>高密度。开花坐果期间作，高密度蔓和果实氮素累积量均高于其他密度，分别为 11.52 kg·hm^{-2}和 184.80 kg·hm^{-2}，差异不显著。果实膨大期间作，中密度蔓和叶片的氮素累积量均高于其他密度，分别为 9.58 kg·hm^{-2}和 27.82 kg·hm^{-2}，差异不显著；低密度下果实氮累积量显著高于高密度和中密度。表明同一播期下低密度间作有利于提高甜瓜果实中氮素累积量，不同密度对蔓和叶片氮素累积量无显著影响。

2.1.2 甜瓜单作和间作氮素利用效率

间作处理甜瓜的氮素利用效率(45.48 kg·kg^{-1})和氮肥偏生产力(35.70 kg·kg^{-1})均显著高于单作处理(32.36 kg·kg^{-1}和 22.98 kg·kg^{-1})，分别提高 40.5%和 55.4%。氮素收获指数(83.76%)高于单作处理(80.34%)，差异不显著(表 2)。表明间作可以提高甜瓜的氮素利用效率和氮肥偏生产力。不同播期下，随着间作播期的推迟，甜瓜的氮素利用效率先增大后减小，开花坐果期间作最高，为 51.12 kg·kg^{-1}，较伸蔓期间作(40.93 kg·kg^{-1})高 24.9%，差异显著，较果实膨大期间作(44.38 kg·kg^{-1})高 15.2%，差异不显著。氮肥偏生产力随间作播期的推迟先增大后减小，开花坐果期间作最高，为 41.31 kg·kg^{-1}，伸蔓期间作其次，为 35.61 kg·kg^{-1}，均显著高于果实膨大期间作的 30.17 kg·kg^{-1}。氮素收获指数随间作播期的推迟，呈下降趋势。伸蔓期间作最高，为 87.32%，显著高于果实膨大期间作(80.68%)，与开花坐果期间作(83.27%)无显著差异。表明在开花坐果期进行间作，可以提高甜瓜的氮素利用效率和氮肥偏生产力。

同一间作播期内，伸蔓期进行间作，甜瓜的氮素利用效率随密度变化无明显差异；氮肥偏生产力随密

表 2 不同间作时期和种植密度下单作及与向日葵间作的甜瓜的氮素利用效率

Table 2 Nitrogen use efficiency of melon monocultured and intercropped with sunflower at different intercropping times with different densities

处理 Treatment			氮素利用效率 Nitrogen use efficiency (kg·kg^{-1})	氮肥偏生产力 Nitrogen partial productivity (kg·kg^{-1})	氮素收获指数 Nitrogen harvest index (%)
种植模式 Planting pattern	间作时期 Intercropping time	种植密度 Planting density			
单作 Monoculture	—	高 High	33.36±2.24a	24.74±1.26a	81.95±1.12a
	—	中 Medium	34.61±2.46a	22.67±0.86a	80.85±2.01a
	—	低 Low	29.11±1.61a	21.53±1.50a	78.22±1.77a
		平均 Average	32.36±1.66C	22.98±0.94D	80.34±1.11B
与向日葵间作 Intercropping with sunflower	伸蔓期 Extension vine	高 High	41.71±1.48a	33.41±3.31b	89.35±0.66a
		中 Medium	40.82±3.65a	40.20±0.45a	84.78±3.13a
		低 Low	40.25±2.57a	33.22±0.96b	87.82±1.08a
		平均 Average	40.93±0.42B	35.61±2.30B	87.32±1.34A
	开花坐果期 Flowering and fruit bearing	高 High	47.28±5.02a	42.55±1.46a	83.72±1.69a
		中 Medium	53.36±1.79a	40.27±3.65a	84.49±0.75a
		低 Low	52.73±10.27a	41.11±2.30a	81.60±2.70a
		平均 Average	51.12±1.93A	41.31±0.67A	83.27±0.86AB
	果实膨大期 Fruit expanding	高 High	52.96±1.98a	30.85±0.82a	79.86±0.83ab
		中 Medium	47.08±1.19a	32.03±0.43a	77.21±1.86b
		低 Low	33.10±5.35b	27.64±1.07b	84.98±0.56a
		平均 Average	44.38±5.89AB	30.17±1.31C	80.68±2.28B
间作平均 Average of intercropping			45.48±2.99AB	35.70±3.22B	83.76±1.93AB

度的增大先升高后降低，中密度最高，为40.20 kg·kg^{-1}，较高密度和低密度间作分别提高20.3%和21.0%，差异显著；氮素收获指数3种密度无显著差异。开花坐果期进行间作，氮素利用效率随密度的增大先增大后减小，中密度最高，为53.36 kg·kg^{-1}，与其他密度间作无显著差异；氮肥偏生产力随密度的变化无显著差异；氮素收获指数高密度和中密度间作均高于低密度间作，差异不显著。果实膨大期进行间作，氮素利用效率随密度的增大而增加，高密度间作最高，为52.96 kg·kg^{-1}，中密度为47.08 kg·kg^{-1}，均显著高于低密度间作的33.10 kg·kg^{-1}；氮肥偏生产力随密度的增大先升高后降低，中密度间作最高，为32.03 kg·kg^{-1}，显著高于低密度间作，但与高密度间作差异不显著；氮素收获指数随密度的减小先降低后升高，低密度间作最高，为84.98%，较高密度和中密度间作分别提高6.4%和10.1%，显著高于中密度，与高密度差异不显著。表明同一播期内，中密度和高密度间作有利于提高甜瓜的氮素利用效率和氮肥偏生产力。

2.2　向日葵氮素累积和利用效率

2.2.1　单作和间作向日葵的氮素累积量

间作处理向日葵植株地上部氮素累积量(125.29 kg·hm^{-2})显著低于单作处理(263.29 kg·hm^{-2})。不同间作播期下，伸蔓期和开花坐果期间作，向日葵植株地上部氮素累积量均显著低于伸蔓期单作和开花坐果期单作处理。果实膨大期间作处理高于果实膨大期单作处理，差异不显著(表 3)。表明间作处理向日葵植株地上部的氮素累积量整体低于单作，间作不利于向日葵植株对氮素的吸收和累积。不同间作播期下，随着间作播期的推迟，向日葵植株地上部氮素累积量先下降后升高，果实膨大期间作处理最高，为 149.28 kg·hm^{-2}，较伸蔓期间作(135.54 kg·hm^{-2})和开花坐果期间作(91.04 kg·hm^{-2})高 10.1%和 64.0%，显著高于开花坐果期间作处理，与伸蔓期间作处理无显著差异。表明在果实膨大期进行间作有利于向日葵植株对氮素的吸收和累积。

表 3　不同间作时期和种植密度下向日葵单作及与甜瓜间作的氮素累积量

Table 3　Nitrogen accumulation of sunflower monocultured and intercropped with melon at different intercropping times with different densities　　kg(N)·hm^{-2}

处理 Treatment			茎 Stem	叶片 Leaf	花盘 Floral disc	籽粒 Grain	地上部合计 Total of above-ground
种植模式 Planting pattern	种植时期 Planting time	种植密度 Planting density					
单作 Monoculture	甜瓜播种期 Sowing of melon	49 995 株·hm^{-2}	56.56±7.38b	49.38±7.32ab	52.70±9.68a	92.25±14.12b	250.89±23.41c
	甜瓜幼苗期 Seedling of melon		77.11±14.33a	46.03±5.14ab	42.57±5.52ab	192.52±24.39a	358.24±5.53a
	甜瓜伸蔓期 Extension vine of melon		41.25±5.78bc	55.18±8.26a	32.90±3.55ab	172.35±9.80a	301.68±11.40b
	甜瓜开花坐果期 Flowering and fruit bearing		46.45±1.56bc	10.03±1.98c	36.80±5.13ab	151.52±13.03a	244.79±19.99c
	甜瓜果实膨大期 Fruit expanding of melon		28.59±2.56dc	30.56±6.18b	21.18±4.73b	80.53±13.65b	160.87±25.50d
		平均 Average	49.99±8.14A	38.24±8.14A	37.23±5.22A	137.83±22.06A	263.29±32.77A
间作 Intercropping	甜瓜伸蔓期 Extension vine of melon	高 High	13.27±0.76b	19.47±3.28a	25.10±2.29a	60.78±3.80b	118.62±14.03b
		中 Medium	27.14±4.02a	30.48±2.97a	27.55±4.58a	83.91±7.68a	169.07±12.41a
		低 Low	25.15±0.56a	23.78±6.16a	20.54±3.16a	49.47±6.85b	118.94±12.15b
		平均 Average	21.85±4.33B	24.58±3.20AB	24.40±2.05AB	64.72±10.14B	135.54±16.76B
	甜瓜开花坐果期 Flowering and fruit bearing of melon	高 High	9.72±1.54a	5.54±2.00a	14.99±2.06a	56.01±5.17a	86.25±13.32a
		中 Medium	15.61±3.62a	5.98±1.01a	19.44±1.81a	44.53±7.24a	85.57±9.76a
		低 Low	17.46±1.48a	8.29±2.06a	18.55±2.16a	57.00±4.19a	101.31±11.11a
		平均 Average	14.26±2.33C	6.60±0.85C	17.66±1.36C	52.51±4.00C	91.04±5.14C
	甜瓜果实膨大期 Fruit expanding of melon	高 High	16.28±0.86a	12.92±2.03a	21.52±2.34a	71.83±11.77b	122.55±10.84b
		中 Medium	24.29±2.19a	20.54±1.89a	24.21±0.55a	100.98±11.46a	170.02±10.01a
		低 Low	15.16±2.43a	15.96±3.77a	39.30±4.63a	84.85±9.03ab	155.27±18.44ab
		平均 Average	18.58±2.87B	16.47±2.21B	28.34±2.53AB	85.89±8.43AB	149.28±14.03B
	间作平均 Average of intercropping		18.23±2.20B	15.88±5.20B	24.37±3.12B	67.71±9.75B	125.29±17.58B

不同间作播期下向日葵各器官氮素累积量中，茎的平均氮素积累量伸蔓期间作最高，为21.85 kg·hm^{-2}，显著高于开花坐果期间作(14.26 kg·hm^{-2})，与果实膨大期间作(18.58 kg·hm^{-2})差异不显著。叶的氮素积累量伸蔓期间作最高，平均为24.58 kg·hm^{-2}，显著高于开花坐果期间作(6.60 kg·hm^{-2})，与果实膨大期间作(16.47 kg·hm^{-2})差异不显著。花盘和籽粒的氮素积累量果实膨大期间作最高，分别为28.34 kg·hm^{-2}和85.89 kg·hm^{-2}，均显著高于开花坐果期间作，与伸蔓期间作差异不显著。表明在伸蔓期和果实膨大期间作有利于向日葵茎和叶片中氮素的累积，在果实膨大期间作有利于向日葵花盘和籽粒中氮素的累积。同一间作播期内，伸蔓期间作处理，中密度籽粒的氮素累积量均显著高于高密度和低密度，叶和花盘的氮素累积量差异不显著；植株地上部氮素累积量中密度最高，为169.07 kg·hm^{-2}，显著高于低密度和高密度。开花期低密度间作，茎、叶、籽粒中氮素的累积量都高于高密度和中密度，差异不显著;花盘中的氮素累积量为中密度最高，为19.44 kg·hm^{-2}，与其他密度差异不显著。果实膨大期间作，低密度花盘中氮素累积量最高，为39.30 kg·hm^{-2}，与其他密度差异不显著；中密度茎和叶的氮素累积量均高于其他密度，均差异不显著；中密度籽粒和植株地上部氮素累积量均显著高于高密度，但与低密度差异不显著。表明低密度和中密度间作有利于向日葵植株和各器官氮素的累积。

2.2.2 向日葵单作和间作氮素利用效率

间作处理向日葵的平均氮素利用效率(18.90 kg·kg^{-1})较单作处理(20.69 kg·kg^{-1})降低8.2%，差异不显著；氮肥偏生产力(7.18 kg·kg^{-1})显著低于单作处理(17.24 kg·kg^{-1})，降低58.4%；氮素收获指数(54.41%)较单作处理(51.87%)提高4.9%，差异不显著(表 4)。表明间作处理可以提高向日葵的氮素收获指数，但是降低了氮素利用效率和氮肥偏生产力。

不同间作播期下，随间作播期的推迟，氮素利用效率呈现增加的趋势，果实膨大期间作最高，为21.20 kg·kg^{-1}，高于伸蔓期间作的17.40 kg·kg^{-1}，差异不显著。随着播期的推迟，氮肥偏生产力先减小后增大，果实膨大期间作最高，为9.29 kg·kg^{-1}，显著高于开花坐果期间作(4.99 kg·kg^{-1})，与伸蔓期间作处理差异不显著。随着间作播期的推迟氮素收获指数呈现增加的趋势，果实膨大期间作最高，为

表 4 不同间作时期和种植密度下向日葵单作及与甜瓜间作的氮素累积量

Table 4 Nitrogen use efficiency of sunflower monocultured and intercropped with melon at different intercropping times with different densities

处理 Treatment			氮素利用效率 Nitrogen use efficiency (kg·kg^{-1})	氮肥偏生产力 Nitrogen partial productivity (kg·kg^{-1})	氮素收获指数 Nitrogen harvest index (%)
种植模式 Planting pattern	种植时期 Planting time	种植密度 Planting density			
单作 Monoculture	甜瓜播种期 Sowing of melon	49 995 株·hm^{-2}	24.04±1.94a	19.33±1.88b	36.41±2.73b
	甜瓜幼苗期 Seedling of melon		20.61±0.66ab	23.77±0.75a	53.87±7.30a
	甜瓜伸蔓期 Extension vine of melon		17.23±1.45b	16.71±1.38bc	57.30±3.88a
	甜瓜开花坐果期 Flowering and fruit bearing of melon		20.05±1.38ab	15.63±0.30c	61.85±0.50a
	甜瓜果实膨大期 Fruit expanding of melon		21.52±2.49ab	10.75±0.49d	49.92±3.07a
		平均 Average	20.69±1.10A	17.24±2.14A	51.87±4.34AB
间作 Intercropping	甜瓜伸蔓期 Extension vine of melon	高 High	19.60±2.30a	7.32±0.74a	52.73±6.77a
		中 Medium	14.57±0.37b	7.85±0.69a	49.50±1.48ab
		低 Low	18.04±2.91ab	6.57±0.62a	41.61±4.48b
		平均 Average	17.40±1.49A	7.25±0.37B	47.95±3.30B
	甜瓜开花坐果期 Flowering and fruit bearing of melon	高 High	18.44±1.29a	4.88±0.61a	64.02±3.76a
		中 Medium	19.23±2.07a	4.96±0.04a	51.65±4.42b
		低 Low	16.65±0.51a	5.13±0.42a	56.90±3.66ab
		平均 Average	18.11±0.76A	4.99±0.07C	57.52±3.58A
	甜瓜果实膨大期 Fruit expanding of melon	高 High	20.83±1.15a	7.67±0.31c	59.01±8.62a
		中 Medium	21.71±0.42a	11.08±0.48a	59.00±3.44a
		低 Low	21.05±3.76a	9.11±0.16b	55.26±2.26a
		平均 Average	21.20±0.26A	9.29±0.99B	57.76±1.25A
间作平均 Average of intercropping			18.90±1.17A	7.18±1.24B	54.41±3.23A

57.76%，开花坐果期间作次之，为57.52%，均显著高于伸蔓期间作(47.95%)。表明间作处理中，果实膨大期间作处理在提高向日葵的氮素利用效率、氮肥偏生产力和氮素收获指数优于其他时期间作处理。

同一间作播期内，伸蔓期进行间作，向日葵的氮素利用效率表现为高密度>低密度>中密度，高密度显著高于中密度，与低密度差异不显著；氮肥偏生产力随密度的变化无明显差异；氮素收获指数随密度增大呈增加的趋势，高密度间作最高，为52.73%，显著高于低密度，与中密度差异不显著。开花坐果期进行间作，氮素利用效率表现为中密度>高密低>低密度，各密度之间差异不显著；氮肥偏生产力随密度的变化无明显差异；氮素收获指数表现为高密度>低密度>中密度，高密度显著高于中密度，与低密度差异不显著。果实膨大期进行间作，氮素利用效率随密度的变化无明显差异；氮肥偏生产力表现为中密度>低密度>高密度，中密度间作显著高于高密度间作；氮素收获指数表现为高密度=中密度>低密度，各密度间差异不显著。表明同一播期内，间作密度对向日葵的氮肥偏生产力无明显的影响，高密度和中密度间作在提高向日葵的氮素利用效率和氮素收获指数优于低密度间作处理。

2.3　间作系统的氮素利用效率

向日葵间作播期对间作系统的氮素利用效率影响较大。整个间作系统的氮素利用效率为果实膨大期间作最高，为34.38 $kg \cdot kg^{-1}$，均高于向日葵同播期单作和甜瓜单作均值(32.23 $kg \cdot kg^{-1}$)，分别提高59.8%和6.7%；伸蔓期间作其次，为24.72 $kg \cdot kg^{-1}$，较向日葵同播期单作提高43.5%，较甜瓜单作均值降低23.3%；开花坐果期间作最低，整个间作系统为22.55 $kg \cdot kg^{-1}$，较向日葵同播期单作提高12.5%，较甜瓜单作均值降低30.0%。整个间作系统的氮肥偏生产力为开花坐果期间作最高，为20.65 $kg \cdot kg^{-1}$，较向日葵同播期单作提高32.1%，而较甜瓜单作均值降低10.1%；伸蔓期其次，为17.80 $kg \cdot kg^{-1}$，较向日葵同播期单作提高6.5%，而较甜瓜单作均值降低22.5%；果实膨大期最小，为15.09 $kg \cdot kg^{-1}$，较向日葵同播期单作提高40.4%。整个间作系统的氮素收获指数均小于向日葵同播期单作和甜瓜单作均值，较向日葵同播期单作降低7.2%~12.5%，较甜瓜单作均值降低28.9%~45.6%。综上所述，向日葵适宜的间作播期为甜瓜果实膨大期。

种植密度对间作系统的氮素利用效率也有很大的影响。整个间作系统的氮素利用效率均小于甜瓜同密度单作，而高于向日葵单作均值。高密度间作最高，为28.54 $kg \cdot kg^{-1}$，较甜瓜同密度单作降低14.2%，而较向日葵单作均值提高25.2%；中密度间作(27.37 $kg \cdot kg^{-1}$)其次，较甜瓜同密度单作降低20.4%，较向日葵单作均值提高20.0%；低密度间作最低，为24.97 $kg \cdot kg^{-1}$，较甜瓜同密度单作降低13.9%，较向日葵单作均值提高9.5%。整个间作系统的氮素利用效率均小于甜瓜同密度单作和向日葵单作均值，高中低密度间作较甜瓜同密度单作分别降低29.6%、15.6%和21.1%，较向日葵单作均值分别降低8.8%、1.0%和12.1%。整个间作系统的氮素收获指数均小于甜瓜同密度单作，其中高密度间作最高，为53.26%，较甜瓜同密度单作降低35.0%；中密度和低密度间作分别为47.93%和52.58%，高密度和低密度间作高于向日葵单作均值，分别提高2.7%和1.4%，而中密度间作低于向日葵单作均值，降低7.6%。因此间作系统适宜的间作密度为株距40 cm。

2.4　间作系统氮素利用效率与光能利用效率的关系

间作系统中，甜瓜的光能利用效率与氮素利用效率呈显著相关关系(r=0.487, P<0.05)，向日葵的光能利用效率与氮素利用效率则无显著相关关系(r=0.226, P>0.05)(图 1)。在本试验参数范围内，随着

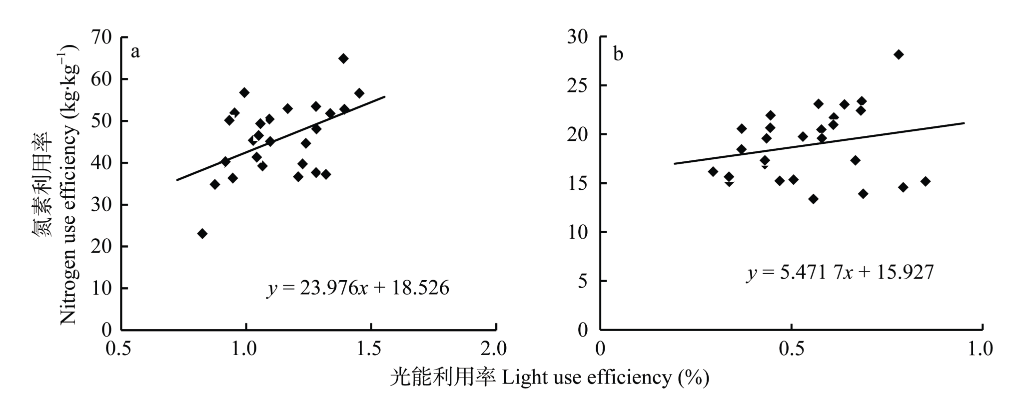


图 1　甜瓜(a)和向日葵(b)的光能利用效率和氮素利用率之间的关系

Fig. 1　Relationship between light use efficiency (PUE) and nitrogen use efficiency (NUE) of melon (a) and sunflower (b)

光能利用率的增加，间作系统中甜瓜的氮素利用率也随着升高，表明间作系统中甜瓜光能利用率和氮素利用率为互相促进的关系。因此考虑间作时，向日葵播期设定在甜瓜生育期的中后期，减少向日葵对甜瓜的遮阴作用，提高甜瓜的光能利用率，进而提高甜瓜的氮素利用效率。

3 讨论与结论

在间作条件下，作物对资源的利用与单作不同，量化作物共生期内每种作物氮素的利用对提高间作体系的产量和效益具有重要意义。作物对养分的吸收和利用能力不同，往往是一种作物养分吸收和利用能力的增强是以降低系统中另一种作物对养分吸收和利用能力作为代价[12]。由于相邻作物之间对资源存在竞争的关系，相对而言，冠层相对较小的作物可以获取更多的资源，从而影响作物生物量形成，造成氮素在作物体内的分配而引起作物氮素转化效率的不同[24]。研究认为，向日葵与西甜瓜间作时，关键在于缩短两种作物的共生期，在保证瓜成熟的前提下，尽量推迟向日葵的播期[13]。本研究中，间作系统提高了甜瓜各器官中氮素的累积量和利用效率，作为代价降低了向日葵各器官中氮素的累积量和氮素利用效率，向日葵在甜瓜开花坐果期间作时，甜瓜的氮素利用效率显著高于其他播期间作，表明过早进行间作可能会对间作的两种作物之间产生不利影响，而适宜的间作期可以提高甜瓜对氮素的利用。Greenwood 等[25]的研究表明，作物通过对光的竞争增加植株的支撑结构(例如茎)的生物量，但同时也导致植物体内氮含量的降低。本研究中，向日葵在甜瓜果实膨大期间作时，向日葵各器官的氮素累积量和氮素利用率显著高于其他播期，表明过早的进行间作，使得甜瓜和向日葵的共生期延长，向日葵对光的竞争能力较强，从而接收了更多的光，生产了更多的干物质，因此导致向日葵各器官氮素含量的降低，这与前人[12–13]的研究结果一致。因此，在甜瓜果实膨大期间作向日葵，两者的共生期缩短，降低了由于竞争引起的甜瓜各器官氮素累积量和氮素利用率的下降，并有利于提高向日葵各器官的氮素累积量和氮素利用率。

研究认为植株体内氮浓度下降与群体对光的竞争能力的强弱有关[26]。与单作比较，间作系统形成了独特的空间结构，高秆作物对矮秆作物的遮蔽，减少了间作中矮秆作物的截光量，从而使矮秆作物体内氮浓度降低。本研究中，向日葵(高秆作物)和甜瓜(矮秆作物)的搭配种植，形成了空间立体结构，甜瓜处于冠层较低处，在向日葵的生长旺盛期，甜瓜的叶片被高秆的向日葵遮蔽，光合能力降低，影响干物质合成，导致甜瓜氮素转化效率降低。共处期短的间作方式，后作物避免了与前作物生长高峰期的营养竞争，这样后作物在前作物收获后，能迅速恢复旺盛生长。研究表明，在西瓜和油葵的间作套种中，西瓜套种油葵共生期长，前期油葵与西瓜争光和肥水，西瓜坐瓜和大小受限制，影响西瓜产量，因此，需调整播期，将油葵播期推迟，使西瓜、油葵共生期约 30 d，不仅可提高瓜的产量和品质，同时也会保证向日葵良好的效益[13]。本研究中在甜瓜开花坐果期和果实膨大期间作向日葵，推迟了向日葵间作播期，缩短甜瓜和向日葵间作共生期，降低向日葵对甜瓜的遮蔽作用，甜瓜的氮素利用效率和氮肥偏生产力都高于单作，有效地解决了由于遮蔽导致矮秆作物氮素利用效率降低的现象。有研究表明，适当增加密度有利于产量提高，并可显著提高氮素利用效率[27]。本研究中在甜瓜果实膨大期间作向日葵，随着甜瓜间作密度的增大，可能原因是甜瓜的根系和冠层量显著增加，特别是深层次的根长密度增加比例显著升高，深层次的氮素吸收明显增加，满足了地上部群体增大后的氮素需求，而植物氮素营养状况的好坏，直接影响其光合速率和生长发育，并最终影响产量和光能利用率。因此在甜瓜/向日葵间作的优化管理中，需要调整好向日葵间作的时期及甜瓜间作的密度，提高该间作模式的生产力。

本试验结果表明，与向日葵间作的甜瓜各器官的氮素累积和利用效率均高于单作，向日葵各器官的氮素累积低于单作，但向日葵间作与单作的氮素利用率差异不显著。向日葵在甜瓜果实膨大期间作时，在提高间作系统的氮肥偏生产力和氮素收获指数方面均优于其他间作播期；高密度间作在提高间作系统的氮素利用效率和氮素收获指数方面均优于其他间作密度。因此，在甜瓜/向日葵间作系统中，获得较高的植株氮素累积量和氮素利用率适宜的向日葵间作播期为甜瓜果实膨大期，适宜间作密度为株距 40 cm。甜瓜的光能利用效率与氮素利用效率呈显著正相关关系，向日葵的光能利用效率与氮素利用效率无显著相关。

参考文献 References

[1] 董宛麟，张立祯，于洋，等. 农林间作生态系统的资源利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 1–8
Dong W L, Zhang L Z, Yu Y, et al. Resource utilization in agro-forestry intercropping ecosystems[J]. Chinese Agricul-

tural Science Bulletin, 2011, 27(28): 1–8

[2] 李少明, 赵平, 范茂攀, 等. 玉米大豆间作条件下氮素养分吸收利用研究[J]. 云南农业大学学报, 2004, 19(5): 572–574
Li S M, Zhao P, Fan M P, et al. Nitrogen uptake and utilization in intercropping system of maize and soybean[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2004, 19(5): 572–574

[3] Read J J, Reddy K R, Jenkins J N. Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(3): 282–290

[4] Zhang L, van der Werf W, Zhang S, et al. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2007, 103(3): 178–188

[5] 褚贵新, 沈其荣, 张娟, 等. 用 ^{15}N 富积标记和稀释法研究旱作水稻/花生间作系统中氮素固定和转移[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 9(4): 385–389
Chu G X, Shen Q R, Zhang J, et al. Comparison of two methods used to study the biological nitrogen fixation and nitrogen transfer from peanut to rice in aerobic soil of intercropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 9(4): 385–389

[6] Karpenstein-Machan M, Stuelpnagel R. Biomass yield nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop[J]. Plant and Soil, 2000, 218(1/2): 215–232

[7] 赵平, 郑毅, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 742–747
Zhao P, Zheng Y, Tang L, et al. Effect of N supply and wheat/faba bean intercropping on N uptake and accumulation of wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 742–747

[8] 段云佳, 谭玲, 张巨松, 等. 施氮量对枣棉间作系统棉花干物质和氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1441–1448
Duan Y J, Tan L, Zhang J S, et al. Effects of different nitrogen fertilizer levels on dry matter and N accumulation of cotton under jujube and cotton intercropping[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1441–1448

[9] 谢飞, 魏慧, 张凯, 等. 间作时期和种植密度对甜瓜/向日葵间作系统光能利用效率的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 652–657
Xie F, Wei H, Zhang K, et al. Effects of intercropping time and planting density on solar energy utilization efficiency of melon/sunflower intercropping system[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 652–657

[10] 袁野, 吴凤芝, 周新刚. 光氮互作对番茄果实糖积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1331–1338
Yuan Y, Wu F Z, Zhou X G. Interactive effects of light intensity and nitrogen supply on sugar accumulation and activities of enzymes related to sucrose metabolism in tomato fruits[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(4): 1331–1338

[11] 金绍龄, 李隆, 张丽慧, 等. 小麦/玉米带田作物氮营养特点[J]. 西北农业大学学报, 1996, 24(5): 35–41
Jin S L, Li L, Zhang L H, et al. N nutrition characteristics of component crops on wheat/maize strip intercropping[J]. Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis, 1966, 24(5): 35–41

[12] 董宛麟, 于洋, 张立祯, 等. 向日葵和马铃薯间作条件下氮素的吸收和利用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 98–108
Dong W L, Yu Y, Zhang L Z, et al. Nitrogen uptake and utilization in sunflower and potato intercropping[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 98–108

[13] 于勇, 秦宏, 何峰, 等. 向日葵间作套种的优点及方式[J]. 现代农业科技, 2010(17): 95, 98
Yu Y, Qin H, He F, et al. Advantages and modes of intercropping of sunflowers[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010(17): 95, 98

[14] 华劲松. 种植密度对间作芸豆群体冠层结构及产量的影响[J]. 作物杂志, 2012(5): 131–135
Hua J S. Effects of density on canopy structure and yield of kidney bean-corn intercropping pattern[J]. Crops, 2012(5): 131–135

[15] 张东升. 不同棉花密度配置的枣棉间作系统光分布和光能利用率研究[D]. 新疆: 石河子大学, 2014
Zhang D S. Effect of cotton plant density on light distribution and LUE of jujube-cotton intercropped systems[D]. Xinjiang: Shihezi University, 2014

[16] 王小林, 张岁岐, 王淑庆. 不同密度下品种间作对玉米水分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 171–178
Wang X L, Zhang S Q, Wang S Q. Effects of cultivars intercropping on maize water balance under different planting densities[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(2): 171–178

[17] 汤复跃, 陈渊, 梁江, 等. 大豆、木薯播期对间作大豆产量和主要农艺性状的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(3): 395–398
Tang F Y, Chen Y, Liang J, et al. Effect of sowing dates on soybean yield and main agronomic characters under soybean intercropping with cassava[J]. Soybean Science, 2012, 31(3): 395–398

[18] 朱元刚, 高凤菊, 曹鹏鹏, 等. 种植密度对玉米–大豆间作群体产量和经济产值的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1751–1758
Zhu Y G, Gao F J, Cao P P, et al. Effect of plant density on population yield and economic output value in maize-soybean intercropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1751–1758

[19] 陈年来, 孙小妹, 张玉鑫, 等. 土壤水分和氮素水平对春小麦水分与氮素利用效率的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 74–81
Chen N L, Sun X M, Zhang Y X, et al. The influence of soil moisture and nitrogen on water and nitrogen use efficiency of spring wheat[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(1): 74–81

[20] 欧阳海, 郑步忠, 王雪娥, 等. 农业气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1990
Ouyang H, Zheng B Z, Wang X E, et al. Agroclimatology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990

[21] 白冬, 高志强, 孙敏, 等. 休闲期深翻覆盖对旱地小麦水氮利用效率和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1497–1503
Bai D, Gao Z Q, Sun M, et al. Effects of deep plowing and mulching in summer fallow period on dryland wheat yield and water-and nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Ecology 2013, 32(6): 1497–1503

[22] 刘秀秀, 鲁剑巍, 王寅, 等. 氮磷钾肥施用对油菜产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(4): 483–488
Liu X X, Lu J W, Wang Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus, potassium fertilizers on seed yield and nutrient uptake and utilization of rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(4): 483–488

[23] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490–496
Jiang L G, Cao W X, Gan X Q, et al. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(4): 490–496

[24] Bernson G M, Wayne P M. Characterizing the size dependence of resource acquisition within crowded plant populations[J]. Ecology, 2000, 81(4): 1072–1085

[25] Greenwood D J, Lemaire G, Gosse G, et al. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass[J]. Annals of Botany, 1990, 66(4): 425–436

[26] Flénet F, Guérif M, Boiffin J, et al. The critical N dilution curve for linseed (*Linum usitatissimum* L.) is different from other C_3 species[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(4): 367–373

[27] 曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 815–822
Cao Q, He M R, Dai X L, et al. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 815–822